

PROPOSITION DE THÈSE – Automne 2014

Sujet : Des modèles statiques aux modèles dynamiques :
propagation des incertitudes dans les modèles géologiques d'écoulement

- **Encadrement:** O. Le Maître (LIMSI - Orsay) et P. Sochala (BRGM - Orléans)
- **Lieu :** BRGM (Orléans)
- **Pour candidater :** CV, notes, lettres de motivation et de recommandation à **envoyer à** olm@limsi.fr, p.sochala@brgm.fr
- **Conditions :**
 - être en master **Analyse numérique** ou **Calcul scientifique** ou **Mathématiques appliquées**
 - être familier des méthodes numériques en éléments finis
 - savoir programmer (python c ou c++)

Contexte (état de l'art et problématique scientifique)

Les performances et la précision des modèles numériques progressant, la prise en compte d'aléas, d'incertitudes et du caractère probabiliste des situations réelles est un élément qui devient incontournable lors des simulations. Ces incertitudes épistémiques présentes dans les modèles résultent d'une connaissance incomplète de la situation réelle ou d'une variabilité intrinsèque. En effet, dans de nombreux cas, l'ensemble des données d'entrée ne peut pas être spécifiée de façon déterministe et une description probabiliste s'avère plus adaptée. L'intérêt de propager et d'analyser les incertitudes dans un système est de fournir une solution plus réaliste en considérant un ensemble plus vaste de situations, contrairement à une simulation déterministe qui traduit une seule configuration. Cette solution plus réaliste permet notamment de définir des intervalles de confiance facilitant ainsi la comparaison avec des observations expérimentales et permettant aussi de mieux juger de la qualité des modèles physiques employés. Dans le cas des écoulements en milieux poreux, des incertitudes paramétriques et géométriques sont présentes. Les incertitudes paramétriques concernent la perméabilité absolue et les perméabilités relatives des différentes phases présentes (e.g. eau et gaz) qui sont déterminés indirectement par méthode inverse, mesures *in situ* et essais en laboratoire. Les incertitudes géométriques sont les positions des interfaces entre les couches géologiques estimées par méthode inverse et par des données issues de forage.

Le traitement des incertitudes dans les simulations numériques requiert trois phases: la modélisation, la propagation et l'analyse. La modélisation diffère selon le type d'incertitudes considéré. Pour les incertitudes paramétriques, les distributions des paramètres d'entrées peuvent être connues a priori (e.g. distribution uniforme, log-uniforme, normale, log-normale, ...) ou déterminées à partir de mesures expérimentales (par la méthode de moindres carrés, de maximisation de vraisemblance ou d'entropie). Les incertitudes géométriques concernent notamment la perméabilité absolue et la porosité du sous-sol et seront appréhendées par la géostatistique. La variabilité spatiale sera décrite par des méthodes de type krigeage et l'interface entre deux couches géologiques sera ainsi définie selon l'écart-type de krigeage. La propagation des aléas paramétriques commence à être bien maîtrisée puisque les méthodes de type Monte-Carlo et les méthodes spectrales [Ghanem91, LeMaître10] (non-intrusives ou intrusives) ont démontré leur performance dans de nombreux domaines comme l'élasticité, la thermique et la mécanique des fluides [Knio06, Tryoen10, Rousseau12, Sochala13]. La méthode de Monte-Carlo (et ses variantes) consiste à explorer l'ensemble des événements possibles de façon aléatoire (ou quasi-aléatoire) en utilisant plusieurs fois le modèle déterministe initial. Elles sont très robustes mais convergent lentement (i.e. requièrent un nombre important de simulations déterministes) ce qui les rend prohibitives lorsque le temps CPU d'une simulation déterministe est important (de l'ordre d'une journée). Dans ce cas, il est nécessaire de construire un modèle simplifié ayant les mêmes propriétés statistiques (moyenne, écart-type, variance, ...) que le modèle initial: il s'agit de réduction de modèle. Les méthodes spectrales sont efficaces puisqu'elles construisent un modèle simplifié en supposant une relation fonctionnelle entre la solution et les données. Le traitement des aléas géométriques est moins abordé même si une méthode de mapping aléatoire [Ghanem96] et une extension de la méthode des éléments finis étendus [Nouy08] ont été proposées. L'analyse porte sur les quantités d'intérêts du modèle et l'exploitation des résultats utilise des outils d'analyse statistique comme les principaux indicateurs statistiques (moyenne, variance et coefficient de variation), les distributions de chaque variable de sortie ainsi que les distributions jointes de plusieurs variables. Des analyses de sensibilité globale estimeront les indices de Sobol [Homma96] qui indiquent la part de la variance relative des paramètres d'entrée sur les quantités d'intérêts. Nous pourrions aussi utiliser des techniques d'estimation de probabilités rares [Morio08] (importance sampling ou théorie des valeurs extrêmes) pour estimer les probabilités de dépassement de seuil indispensables lors de l'analyse de risque.

Objectifs de la thèse

Nous proposons dans cette thèse de travailler selon trois axes.

1 - Les incertitudes paramétriques concernant les perméabilités relatives et plusieurs distributions réalistes des paramètres empiriques seront considérées. Les incertitudes géométriques seront modélisées par les outils géostatistiques [Caers11] et prendront notamment en compte les indéterminations des positions des interfaces entre les différentes couches géologiques (i.e. l'incertitude sur la position des formations les unes par rapport aux autres). Les deux méthodes citées plus haut (mapping aléatoire et extension de la méthode des éléments finis étendus) pourront être adaptées.

2 - Les incertitudes seront propagées grâce à une réduction de modèle en utilisant les méthodes spectrales. La méthode non-intrusive (sans modification de code déterministe) sera privilégiée mais la méthode intrusive pourra également être implémentée.

3 - L'analyse des résultats se focalisera sur des quantités d'intérêts traduisant un impact environnemental significatif. Pour ces quantités d'intérêts, nous estimerons et interpréterons les indicateurs statistiques, les distributions de chaque variable et les distributions jointes (avec éventuellement des isovalues de probabilité), les indices de sensibilité globale ainsi que les probabilités de dépasser des seuils critiques fixés.

Domaine d'application

Les domaines d'application de cette thèse sont les exploitations du sous-sol notamment la géothermie haute énergie et le stockage géologique de CO₂. La géothermie haute énergie repose sur l'exploitation de l'eau chaude souterraine tandis que le principe du stockage géologique de CO₂ est d'injecter le dioxyde de carbone émis par les sites industriels dans des réservoirs géologiques profonds. Les principales quantités d'intérêts sont la température dans les puits de pompage pour la géothermie et la surpression maximale ainsi que l'extension spatiale du nuage de gaz pour le stockage géologique. Les résultats attendus concernent les corrélations entre les quantités d'intérêts et également des probabilités de dépassement de seuil indispensables lors de l'analyse de risque. Par exemple, à partir d'une configuration initiale stochastique du système (i.e. incluant les incertitudes paramétriques et géométriques), la modélisation envisagée permettra de connaître la probabilité que le nuage de CO₂ pollue une nappe phréatique.

Références

- [1] Caers, J: ***Modeling Uncertainty in the Earth Sciences***. Wiley-Blackwell, UK, (2011)
- [2] R.G. Ghanem and P.D. Spanos, ***Stochastic Finite Elements: A spectral Approach***, Springer-Verlag, Berlin/New York, 1991.
- [3] O. Knio and O. Le Maître, ***Uncertainty propagation in CFD using Polynomial Chaos decompositions***, Fluid Dynamics Research, (38):9, pp.616-640, (2006).
- [4] J. Tryoen, O. Le Maître, M. Ndjinga and A. Ern, ***Intrusive Galerkin Methods with Upwinding for Uncertain Nonlinear hyperbolic systems***, J. Computational Physics, 228:18, pp. 6485-6511, (2010).
- [5] R.G. Ghanem, V. Brzakala, V., ***Stochastic finite element analysis for randomly layered media***, ASCE Journal of Engineering Mechanics, Vol. 122, No. 4, pp. 361-369,1996.
- [6] A. Nouy, A. Clément, F. Schoefs, N. Moës, ***An extended stochastic finite element method for solving stochastic partial differential equations on random domains***, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 197, 51–52, 2008
- [7] M. Rousseau, O. Cerdan, A. Ern, O. Le Maître, P. Sochala, ***Study of overland flow with uncertain infiltration using stochastic tools***, Advances in Water Resources,
- [8] Sochala, P., Le Maître, O.: ***Polynomial Chaos expansion for subsurface flows with uncertain soil parameters***, AWR, 62,139--154, (2013)
- [9] Le Maître, O., Knio, O.M.: ***Spectral methods for uncertainty quantification***, Springer,(2010)
- [10] Morio, J., Pastel, R., Le Gland, F.: ***Estimation de probabilités et de quantiles rares pour la caractérisation d'une zone de retombée d'un engin***, Journal de la Société Française de Statistique,152(4), 1--29,(2011)